

# 半導体メゾスコピック構造における電子スピン干渉効果に関する研究

著者	長澤 郁弥
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第17012号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/64381">http://hdl.handle.net/10097/64381</a>

氏名	ながさわ ふみや 長 澤 郁 弥
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 知能デバイス材料学専攻
学位論文題目	半導体メゾスコピック構造における電子スピン干渉効果に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 新田 淳作 東北大学教授 高梨 弘毅 東北大学教授 小山 裕 東北大学准教授 好田 誠

## 論文内容要約

現在のエレクトロニクスにスピン自由度を併用することで新奇デバイスの創出を目指すスピントロニクス分野では、固体中における電子スピンの制御が要素技術とされる。そこで近年注目されているのが、系のトポロジ（幾何学）を用いたスピン制御手法である。幾何学的に制御された量子状態は時間依存する外部擾乱に耐性を有するため、ロバストなスピン制御が可能となる。本論文では、トポロジに関連した、新たな二つの電子スピン制御手法の実証を目的とした。

そのひとつは、電子スピンの幾何学的位相を観測・制御することである。幾何学的位相は新たな位相制御の自由度を与えるだけでなく外部擾乱耐性を有するため、スピン量子ビットなどの次世代スピントロニクス素子の実現にとって大変重要な意義をもつ。ところが、電子スピンの幾何学的位相は 1984 年の Berry の論文において最も単純なスピン  $1/2$  系の例として挙げられているものの、それを実験的に検証するのは困難であり続けた。そこで、本研究では Rashba スピン軌道相互作用を有する量子リングを用いることで、スピン幾何学的位相の観測・制御を目指した。

本論文の目的のもうひとつは、III-V 族化合物半導体の結晶構造に由来する Dresselhaus スピン軌道相互作用を電氣的に制御することである。半導体量子井戸構造にあらわれる Rashba および Dresselhaus スピン軌道相互作用の強さを等しくすると特殊な対称性の磁場構造が生じ、電子スピンの長距離輸送が可能となるため、スピンを情報担体としたデバイスの実現に向け注目を集めている。そのためにはスピン軌道相互作用の制御技術が重要となるが、これまで Rashba スピン軌道相互作用はゲート電圧による制御が実現されているものの、Dresselhaus スピン軌道相互作用については量子井戸の閉じ込め幅を変化させる、つまり異なる基板構造を用いることでのみ制御されてきた。そこで、本研究では、より簡便な制御手法であるゲート電圧を用いた Dresselhaus スピン軌道相互作用の電氣的制御を目指した実験をおこなった。

これら二つの研究目的を達成するため、半導体 InAlAs/InGaAs 量子井戸構造を微細加工することで作製した電子スピン干渉計を用い、極低温にて量子干渉効果を観測し、スピン位相を評価した。

本論文は全 8 章からなる。第 1 章では、スピントロニクス分野の背景と課題、そして本論文の目的を述べた。第 2 章では、Aharonov-Bohm 効果や Aharonov-Casher 効果などの量子干渉効果やスピン軌道相互作用など、本論文が対象とする物理の原理について述べた。第 3 章では、実験に用いた半導体基板の設計指針やスピン干渉計の作製プロセスについての詳細、液体ヘリウム冷凍機を用いた電気測定系について述べた。第 4 章から第 7 章

が本論文の中核となる研究成果をまとめた部分である。以下にその詳細を述べる。

#### 第4章：リング配列構造を用いたスピン干渉効果の観測

続く章で述べる物理を正しく観測するため、まず電子スピン位相の評価技術の確立を目指した。図1に示すトップゲート電極付き微小リング配列構造の面直磁気抵抗を極低温（1.5 K）にて測定したところ、量子干渉効果が観測された。量子干渉効果のトップゲート電圧依存性を図2に示す。図2の負のゲート電圧領域では量子井戸の最低量子化準位のみが占有されており、このときゲート電圧による Rashba スピン軌道相互作用の変調に起因した周期的なスピン干渉効果（Aharonov-Casher 効果）が観測された。このように、量子干渉効果のゲート電圧依存性を観測することで電子スピンの位相が評価可能であることを明らかにした。また、本論文では多数のリングで構成される配列構造を用いており、先行研究における少数のリング配列構造を用いた場合よりも簡便にスピン位相を評価可能であることがわかった。さらに、量子井戸の第2量子化準位の占有領域（図2の正のゲート電圧領域）では、サブバンド間の散乱によりスピン干渉効果による抵抗振動が抑制されることを明らかにした。この結果は、リング配列構造を用いることでスピン軌道相互作用を有する系において普遍的にあらわれる量子補正項が観測可能となることを示唆している。

#### 第5章：Dresselhaus スピン軌道相互作用の電氣的制御

第4章で実現したスピン位相評価技術を用い、III-V 族化合物半導体結晶構造に由来する Dresselhaus スピン軌道相互作用のゲート電圧による電氣的制御を目指した。Dresselhaus スピン軌道相互作用は Fermi 波数の一次項と三次項を有し、これらの項が競合することに注目した。本章では Dresselhaus スピン軌道相互作用とリング面内の外部磁場の競合が引き起こす異方的スピン干渉効果を、キャリア密度を変えながら測定した。半径 0.6  $\mu\text{m}$  のリング配列構造において、面内磁場を 1 T とし、スピン干渉シグナルの磁場印加角度依存性を観測した結果を図3に示す。キャリア密度（ゲート電圧）の変調による異方性の符号反転が観測された。量子井戸内の歪みが誘起する Dresselhaus スピン軌道相互作用への影響も考慮したところ、異方性の符号反転が生じるキャリア密度の値は理論的に予測される値と一致することがわかった。さらに、再帰 Green 関数法を用いた数値計算によりキャ

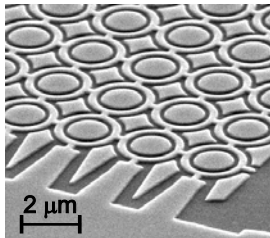


図1: リング配列構造の電子顕微鏡写真。半径とリング幅はそれぞれ 0.6  $\mu\text{m}$  および 0.2  $\mu\text{m}$  である。続く工程でトップゲート電極を取り付けた。

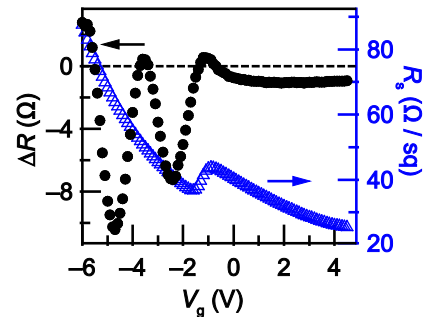


図2: 半径 0.6  $\mu\text{m}$  の試料において観測された量子干渉振動振幅のゲート電圧  $V_g$  依存性。右垂直軸は Hall 素子のシート抵抗を示す。測定温度は 1.5 K。

リア密度変調による異方性の符号反転を再現した。以上より、Dresselhaus スピン軌道相互作用の実効的な強さをゲート電圧により電氣的に制御することに成功した。

## 第6章：スピン幾何学的位相の観測

Rashba スピン軌道相互作用を有するスピン干渉計を用い、これまで確実な実証報告のなかった電子スピンの幾何学的位相の観測を目指した。Rashba スピン軌道相互作用やリング径によりスピン輸送の断熱性が変化することに着目し、半径の異なるリング配列構造においてスピン干渉効果を測定した。図4に示すように、周期の異なる Aharonov-Casher 効果が観測された。これらの結果に理論式をフィッティングすることでスピン幾何学的位相を評価した。結果を図5に示す。実験結果は、図5にて点線で示した理論から予測される値と同様の径依存性を示すことがわかった。これより、電子スピンの幾何学的位相を明瞭に観測することに成功した。さらに、リング径と Rashba スピン軌道相互作用の強さを併せて考えることで、Aharonov-Casher 効果の振動単位となる項を同定した。

## 第7章：外部磁場を用いたスピン幾何学的位相の制御

第6章において電子スピンの幾何学的位相を観測したが、能動的スピンデバイス実現には外部パラメタにより幾何学的位相を制御することが望ましい。そこで、リング面内の外部磁場印加による幾何学的位相制御を試みた。半径  $0.6\ \mu\text{m}$  のリング配列構造に対し面内磁場を印加したところ、図6(a)に示すように Aharonov-Casher 効果の位相シフトが観測された。この位相シフトは図6(b)の摂動理論による結果および図6(c)における再帰 Green 関数法を用いた数値計算結果においても再現された。摂動理論によると、面内磁場による位相のシフトは電子スピンの幾何学的位相成分の変調に起因することがわかった。これより、外部パラメタである面内磁場によりスピン幾何学的位相が制御可能であり、その位相変化は Aharonov-Casher 効果のシフトとして直接的に観測可能であることを明らかにした。また、面内磁場印加により観測された幾何学的位相の変化量は、第6章のリング径を変えた場合より2倍程度大きな値となることがわかった。

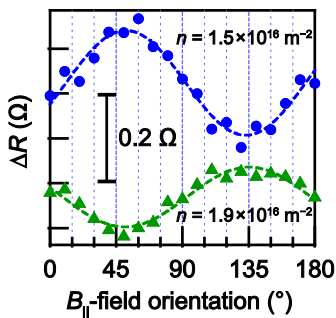


図3: 異なるキャリア密度  $n$  における量子干渉振幅の面内磁場印加角度依存性。面内磁場の強さは1 Tで一定である。

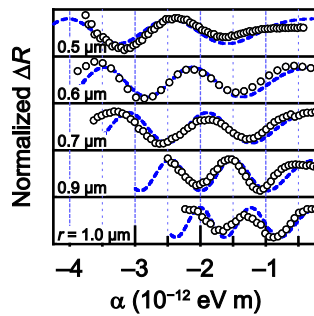


図4: 異なるリング径におけるスピン干渉効果。水平軸は Rashba スピン軌道相互作用の強さをあらわし、ゲート電圧に比例する。 $r$  はリング半径をあらわす。

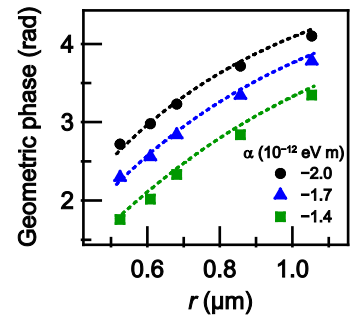


図5: スピン幾何学的位相のリング半径依存性。Rashba スピン軌道相互作用の強さの異なる3点についてプロットした。点線は理論値を示す。

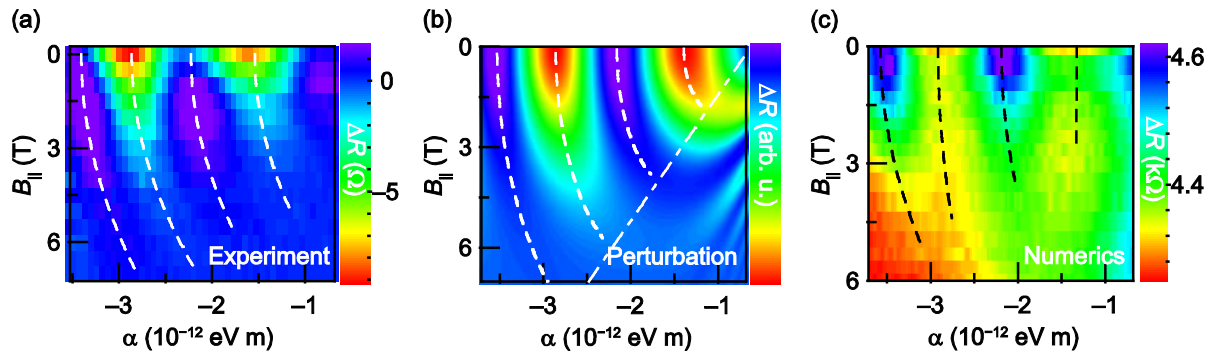


図 6: 半径  $0.6 \mu\text{m}$  のリング配列構造におけるスピン干渉効果の面内磁場依存性。垂直軸は面内磁場、水平軸は Rashba スピン軌道相互作用の強さをあらわす。(a)実験結果。(b)摂動理論による結果。面内磁場を摂動項としているため、一点鎖線で示す領域付近では近似が破綻する。(c)再帰 Green 関数法を用いた数値計算の結果。

以上の成果をまとめると、本論文は、半導体リング配列構造における電子スピンの位相評価技術をもとに、Dresselhaus スピン軌道相互作用が電氣的に制御可能であることを実証し、また電子スピンの幾何学的位相を明瞭に観測・制御した初めての結果である。これらの結果は基礎物理学分野にて重要であることはもちろん、電子スピンを情報担体とした量子エレクトロニクス発展の礎となる研究成果である。